

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## MODELOVÁNÍ REFLEKTOROVÉ ANTÉNY PRO SPECIÁLNÍ RADIOLOKAČNÍ POUŽITÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

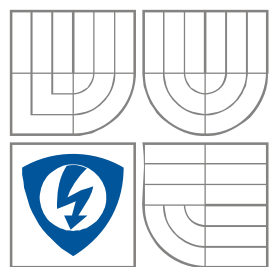
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

IVO KAČMAŘÍK

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# MODELOVÁNÍ REFLEKTOROVÉ ANTÉNY PRO SPECIÁLNÍ RADIOLOKAČNÍ VYUŽITÍ

DESIGN OF REFLECTOR ANTENNA FOR SPECIAL RADAR APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ivo Kačmařík

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.

BRNO, 2008

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Ivo kačmařík  
Bytem: V Korunce 44, Ostrava, 713 00  
Narozen/a (datum a místo): 2. června 1986 v Ostravě

(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
  - ☐ diplomová práce
  - ☒ bakalářská práce
  - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Modelování reflektorové antény pro speciální radiolokační použití

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\* :

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy  
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 6. června 2008

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce bylo navržení malé parabolické reflektorové antény v programu CST Microwave Studio a její následná realizace a ověření jejích parametrů praktickým měřením. Základními požadavky návrhu byly rozumné rozměry antény a její dobré elektrické vlastnosti, především byl kladen důraz na optimalizaci impedančního přizpůsobení a směrové charakteristiky.

## **Klíčová slova**

Anténa, reflektor, návrh, radiolokace

## **Abstract**

The aim of this bachelor's thesis was to design small parabolic reflector antenna in program CST Microwave Studio and its execution and verifying of its parameters by the laboratory measurements. Basic demands were rational proportions of the antenna and its good electrical properties, especially optimization of impedance matching and directional characteristics.

## **Keywords**

Parabolic antenna, reflector antenna design, radiolocation

KAČMAŘÍK, I. *Modelování reflektorové antény pro speciální radiolokační použití*.  
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních  
technologií, 2008. 35 s.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Modelování reflektorové antény pro speciální radiolokační využití jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 6. června 2008

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zbyňku Lukešovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 6. června 2008

.....  
podpis autora

# Obsah

1. Úvod .....	10
2. Parametry antén .....	11
2.1 Zisk .....	11
2.2 Činitel směrovosti $D(\varphi, \vartheta)$ .....	12
2.3 Směrová charakteristika .....	12
2.3.1 Šířka hlavního laloku .....	12
2.3.2 Postranní lalok .....	12
3. Reflektorová anténa .....	13
3.1 Vliv rozměrů primárního zářiče .....	13
3.2 Primární zářič .....	14
3.2.1 Anténa s pyramidálním zářičem .....	14
3.2.2 Mikropásková anténa .....	15
3.3 Parabolický reflektor .....	17
4. Návrh antény s trychtýřovým ozařovačem .....	19
4.1 Návrh trychtýřového ozařovače .....	19
4.1.1 Parametry trychtýřového ozařovače .....	20
4.2 Návrh reflektorové antény .....	21
4.2.1 Parametry reflektorové antény .....	22
4.3 Návrh reflektorové antény s offset napájením .....	24
4.3.1 Parametry reflektorové antény s offset napájením .....	24
4.4 Návrh offsetové reflektorové antény .....	26
4.4.1 Parametry offsetové reflektorové antény .....	26
5. Návrh antény s flíčkovým (patch) ozařovačem .....	28
5.1 Návrh patch ozařovače .....	28
5.1.1 $S_{11}$ parametr patch ozařovače .....	29
5.2 Ozáření paraboly pomocí patch antény .....	29
6. Praktická měření .....	30
7. Závěr .....	34
8. Literatura .....	35



# Seznam obrázků

Obr. 1: Trychtýřová anténa .....	15
Obr. 2: Mikropásková anténa.....	15
Obr. 3: Mikropásková anténa a napájení pomocí koaxiální sondy.....	16
Obr. 4: Řez rotačním paraboloidem.....	17
Obr. 5: Dráhy paprsků v reflektoru.....	18
Obr. 6: Reflektor s offset napájením .....	18
Obr. 7: Navržený trychtýřový ozařovač.....	20
Obr. 8: Vyzařovací charakteristika trychtýřového ozařovače .....	20
Obr. 9: Činitel odrazu trychtýřového ozařovače.....	21
Obr. 10: Navržená reflektorová anténa.....	22
Obr. 11: Vyzařovací charakteristika reflektorové antény .....	23
Obr. 12: Činitel odrazu reflektorové antény .....	23
Obr. 13: Návrh reflektorové antény s offset napájením .....	24
Obr. 14: Vyzařovací charakteristika reflektorové antény s offset napájením .....	25
Obr. 15: Činitel odrazu reflektorové antény s offset napájením .....	25
Obr. 16: Návrh offsetové reflektorové antény .....	26
Obr. 17: Vyzařovací charakteristika offsetové reflektorové antény .....	27
Obr. 18: Činitel odrazu offsetové reflektorové antény.....	27
Obr. 19: Navržený patch ozařovač – pohled zepředu a z boku .....	28
Obr. 20: Činitel odrazu patch ozařovače .....	29
Obr. 21: Činitel odrazu reflektorové antény s patch ozařovačem .....	29
Obr. 22: Měřicí přístroj Agilent E8364B .....	30
Obr. 23: Skutečný činitel odrazu patch ozařovače.....	30
Obr. 24: Vyrobený patch ozařovač .....	31
Obr. 25: Skutečný činitel odrazu upraveného patch ozařovače.....	31
Obr. 26: Uchycení patch ozařovače k parabole.....	32
Obr. 27: Celá anténní soustava .....	32
Obr. 28: Skutečný činitel odrazu anténní soustavy.....	33

# 1. Úvod

Mým úkolem v této bakalářské práci bylo navrhnout a optimalizovat v programu CST Microwave Studio malou reflektorovou anténu. Dále její vlastnosti ověřit v jiném programu a po praktickém zhotovení antény její parametry proměřit.

V úvodu své práce jsem se rozhodl teoreticky popsat základní elektrické parametry antén, na které jsem se zaměřil při následném návrhu a také obecný popis reflektorových antén.

V další části jsem popsal samotný návrh antény, od ozařovače po celou soustavu, při kterém jsem se snažil dosáhnout co nejlepších elektrických parametrů antény, jako jsou zisk, impedanční přizpůsobení a směrová charakteristika. Následovalo vyrobení antény a ověření výsledků softwarových simulací praktickým měřením.

## 2. Parametry antén

### 2.1 Zisk

Zisk antény [4] je obecně definován jako součin činitele směrovosti  $D$  a účinnosti  $\eta$ :

$$G = D \cdot \eta \quad (1)$$

V pásmu metrových a decimetrových vln se účinnost blíží jedné, takže  $G \approx D$ . V těchto pásmech se zavádí veličina charakterizující kolikrát je  $D_{\max}$  nějaké směrové charakteristiky (většinou směrové antény) větší než  $D_{\text{ref}}$  nějaké srovnávací (referenční) antény, tzv. relativní zisk antény

$$G_{\text{rel}} = \frac{D_{\max}}{D_{\text{ref}}} \quad (2)$$

Za srovnávací anténu se většinou volí půlvlnný dipól (s délkou ramene  $l = \lambda / 4$ ). Maximální činitel směrovosti půlvlnného dipólu je 1,64. Z toho vyplývá, že relativní zisk určité antény je pak

$$G_{\text{rel}} = \frac{D_{\max}}{1,64} \quad (3)$$

U plošných antén se zisk definuje jako podle vztahu (1), ale hodnota  $D$  se nahradí maximálním možným činitelem směrovosti pro aperturu o dané ploše. Této maximální hodnoty se dosáhne pouze při rovnoměrném ozáření. Hodnota maximálního činitele směrovosti se spočítá jako

$$D_{\max} = \frac{4\pi \cdot S}{\lambda^2} \quad (4)$$

Místo účinnosti antény ze vztahu (1) se zavádí veličina  $\nu$ , tzv. činitel využití ústí (redukovaný zisk). Zahrnuje všechny ztráty, nejen tepelné, ale u parabolických antén také ztráty způsobené nerovnoměrným ozářením reflektoru nebo stíněním primárním zářičem. Pro plošné antény může dosáhnout činitel využití ústí až hodnoty 0,8. Pro zisk skutečné antény pak platí výsledný vzorec:

$$G_{\max} = \nu \cdot \frac{4\pi \cdot S}{\lambda^2} \quad (5)$$

## 2.2 Činitel směrovosti $D(\varphi, \vartheta)$

Ze vztahu pro výpočet intenzity pole antény z vyzařovaného výkonu  $P_\Sigma$

$$|E(\varphi, \vartheta)| = \frac{\sqrt{30 P_\Sigma D(\varphi, \vartheta)}}{r} \quad (6)$$

si můžeme udělat dobrou představu o významu činitele směrovosti. Ten jakoby násobí vyzařovaný výkon, ovšem v různých směrech různě. Hodnota činitele směrovosti je závislá jen na tvaru směrové charakteristiky. [4]

## 2.3 Směrová charakteristika

Je grafickým znázorněním charakteristiky záření antény, která popisuje vyzařovací vlastnosti antény v prostorových souřadnicích a udává směrovou závislost veličin v určené vzdálenosti od antény.

Hodnoty se většinou zakreslují v relativní míře, čili všechny hodnoty jsou vyděleny hodnotou maximální.

Kreslí se v polárních nebo kartézských souřadnicích. Obrázek v polárních souřadnicích je názorný, ale při zobrazení v kartézských souřadnicích je snazší odečítat číselné hodnoty.

Grafické znázornění je většinou rozčleněno do laloků (laloky hlavní, postranní, zadní). Maximum naměřené veličiny se většinou přiřazuje  $0^\circ$  na úhlové stupnici.

[1] [4]

### 2.3.1 Šířka hlavního laloku

Jednoduše charakterizuje směrové vlastnosti antény. Používá se tzv. úhlová šířka hlavního laloku  $2\theta_{0,7}$ . je tzv. úhel polovičního výkonu, který je určen úhlem mezi dvěmi hodnotami na hlavním laloku záření, které odpovídají buď hodnotě 0,707 napětí naměřeného na vzdáleném přijímači, nebo hodnotě -3 dB oproti hodnotě ve směru maxima záření. [1]

### 2.3.2 Postranní lalok

Postranní lalok je lalok diagramu záření antény ve směru jiném než je lalok hlavní. Úroveň postranních laloků se určuje vzhledem k úrovni maxima hlavního laloku a vyjadřuje se obvykle v dB. Potlačení úrovně postranních laloků lze docílit například změnou rozložení amplitudy elektrického pole v ústí antény, případně ochrannými prvky na okrajích antény (difrakční límce). Je zřejmé, že úroveň postranních laloků by měla být co nejmenší. [1]

### 3. Reflektorová anténa

Reflektorová anténa se sestává z jednoho nebo více vhodně tvarovaných odrazných vodivých povrchů (reflektoru) a příslušného primárního zářiče (ozářovače).

Jejich základní vlastností, díky které se masivně rozšířily zejména v oblasti dm, cm a mm vln je to, že dokáží soustřeďovat vlnovou energii do úzkého svazku vln nebo do předem určeného tvaru diagramu záření. Běžné reflektory využívají různé plochy rovinné i zakřivené (plošné reflektory, reflektory tvořené částí plochy paraboloidu a další). Základním principem všech reflektorových antén s plošným reflektorem je to, že elektromagnetická vlna vyzařovaná primárním zářičem dopadá na povrch reflektoru a indukuje na něm proudy, které vytvářejí odražené elektromagnetické pole. Čelo odražené vlny v ústí (apertuře) reflektoru je buď rovinné nebo má speciální tvar, který vytváří požadovaný diagram záření. [3]

#### 3.1 Vliv rozměrů primárního zářiče

Za určitých zjednodušujících předpokladů provedl tuto analýzu Crompton, přičemž sledoval vliv rozměrů primárního zářiče, při dané vlnové délce  $\lambda$  na zisk antény, šířku svazku, blízké postranní laloky a postranní laloky vzniklé přezářením přímo z primárního zářiče.

Uvažujme obdélníkový reflektor o obecné velikosti  $D$  v každé rovině, ohniskovou vzdálenost  $f$  mezi reflektorem a primárním zářičem a primární zářič s obdélníkovou aperturou a rozměrech  $d$ .

Při malé velikosti apertury primárního zářiče, pro  $d \ll \lambda$ , je jeho směrová charakteristika široká, a dá se uvažovat, že objektiv je ozářen s rovnoměrnou amplitudou. Zisk je pak poměrně malý, protože objektiv nedokáže vzhledem ke své omezené velikosti odrazit veškerou vyzářenou energii. Říkáme, že anténa přezáruje.

Přezáření je nejlépe charakterizováno pomocí absolutní hodnoty zisku vzhledem k izotropickému zářiči. Při  $d/\lambda \rightarrow 0$  můžeme předpokládat, že právě primární zářič je takovým izotropickým zářičem, takže tehdy je úroveň přezáření charakterizována hodnotou 1, tedy 0 dB.

Pokud zvyšujeme poměr  $d/\lambda$ , zužuje se šířka svazku primárního zářiče a postupně větší část celkové vyzářené energie je zachycována objektivem, tím vzrůstá zisk antény. Proti tomuto jevu však působí jev opačný. S rostoucím  $d/\lambda$  se snižuje amplituda pole na okrajích objektivu, čímž se rozšiřuje svazek a klesá zisk. Současně se snižuje úroveň blízkých postranních laloků, což je ovšem jev žádoucí. Zisk antény a tedy i zisková účinnost dosáhne pro jisté  $d/\lambda$  maximální hodnoty. Toto maximum bývá obvykle velmi ploché. V této oblasti  $d/\lambda$  dochází ke kompenzaci přírůstku zisku vlivem menšího přezáření a poklesu zisku vlivem menšího využití apertury. Při zvětšování  $d/\lambda$  nad hodnotu, odpovídající maximu zisku, začne převládat pokles zisku vlivem menšího využití apertury objektivu. Výpočty ukazují, že maximum zisku nastává prakticky při všech konfiguracích  $D/f$ , když relativní úroveň ozáření okraje objektivu vzhledem k jeho středu je přibližně -8 až -10 dB.

Přitom se obdrží pro rotační paraboloid maximální zisková účinnost  $\nu \cong 0,8$ . V uvedeném optimálním stavu je pak šířka svazku na úrovni -3 dB dána přibližně vztahem

$$2\theta_{0,7} \cong 70^\circ \cdot \frac{\lambda}{D}, \quad (7)$$

a to prakticky nezávisle na poměru  $D/f$ .

Blízké postranní laloky při  $d/\lambda$  blízkém optimu z hlediska zisku mají úroveň okolo -20 až -23 dB. S rostoucím  $d/\lambda$  postranní laloky klesají.

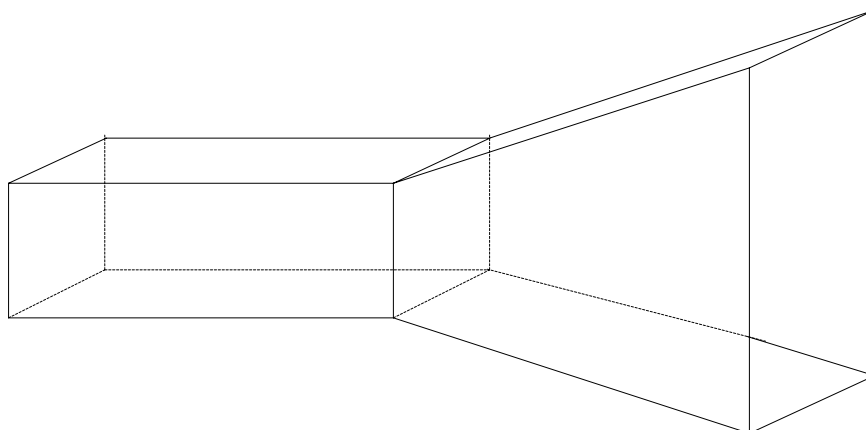
Pro přezáření platí, že s rostoucím  $d/\lambda$  úroveň přezáření nejprve vzrůstá a pak se drží na jisté konstantní hodnotě. Dochází totiž ke vzájemné kompenzaci vzrůstu zisku primárního zářiče a poklesu úrovně záření na okraji objektu při zvyšujícím se  $d/\lambda$ . Pokud chceme docílit podstatnějšiho snížení úrovně přezáření, je třeba použít speciální primární zářič s tvarovanou směrovou charakteristikou, jejíž boky jsou strmé a postranní laloky velmi malé. [2] [3]

## 3.2 Primární zářič

V obecném významu je to zářič, transformující vlnění z vedení do volného prostoru. Nejběžnějším takovým, zářičem je dipól, v pásmu centimetrových jsou však daleko častější trychtýřové a štěrbinové antény. Tyto antény nemusí sloužit pouze jako primární zářiče, ale mohou se použít i samostatně, tam kde nám jejich technické parametry dostačují. Nejjednodušší plošnou anténou je otevřené ústí vlnovodu, případně mikropásková anténa. [3]

### 3.2.1 Anténa s pyramidálním zářičem

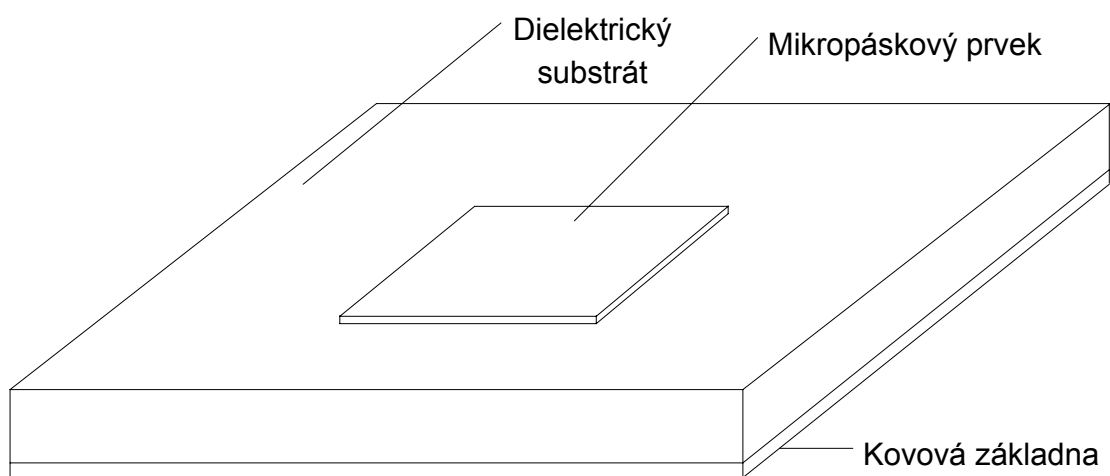
Je nejpoužívanějším typem trychtýřové antény. Její velkou výhodou je velmi jednoduchá výroba. Vznikne pozvolným rozšířením vlnovodu (čtvercového nebo obdélníkového) před jeho ústím, čímž se velmi zlepší impedanční přizpůsobení, oproti obyčejnému otevřenému ústí vlnovodu. Takováto trychtýřová anténa v podstatě transformuje pole dominantního vidu  $TE_{10}$  z vlnovodu do ústí apertury. Vlastnosti trychtýřové antény závisí na rozměrech apertury a na rozložení budícího pole v rovině ústí. [3]



**Obr. 1:** Trychtýřová anténa

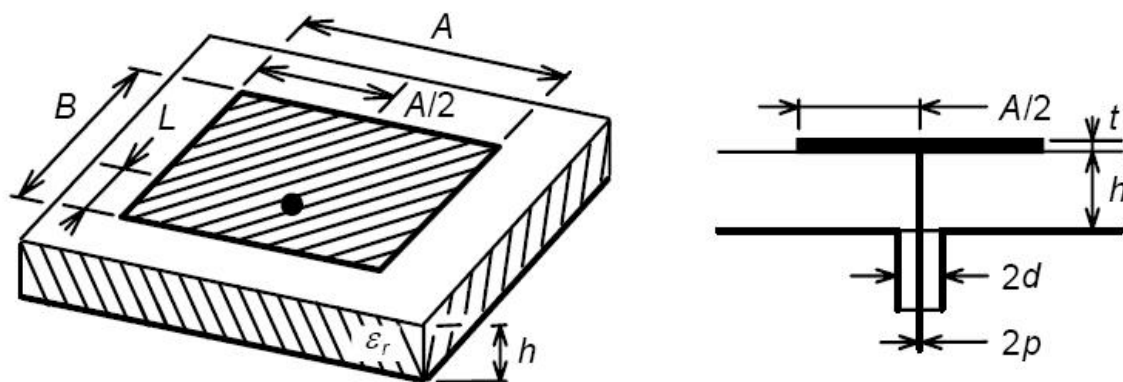
### 3.2.2 Mikropásková anténa

Mikropásková anténa je tvořena kovovým páskovým vodičem upevněným na jedné straně tenké dielektrické desky, jejíž opačná strana je opatřena kovovou protiváhou. Anténní prvek má charakter flíčku z mědi nebo zlata. Může mít různé tvary podle požadavků na způsob vyzařování.



**Obr. 2:** Mikropásková anténa

Permitivita dielektrika (substrátu) bývá většinou okolo  $\varepsilon_r = 2,5$ , aby se zvýšila intenzita pole na okrajích flíčku (patche). Hlavní výhodou mikropáskových antén je nízká váha, malý objem, převážně plošný rozměr, kompatibilita s technologií mikrovlnných integrovaných obvodů. Hlavní nevýhodou mikropáskových antén je poměrně úzké pracovní kmitočtové pásmo, ztráty v substrátu, nižší zisk a nízká výkonová zatížitelnost. Nejčastěji má mikropásková anténa tvar pravoúhlého flíčku, napájeného nejčastěji koaxiální sondou nebo mikropáskovým vedením.



**Obr. 3:** Mikropásková anténa a napájení pomocí koaxiální sondy

Při napájení koaxiální sondou je střední vodič koaxiálního vedení připojen k anténnímu prvku a vnější vodič vedení je spojen se zemní plochou. Při tomto způsobu napájení nedochází k vyzařování parazitních vln, a tudíž ani k deformaci směrové charakteristiky. Nevýhodou tohoto způsobu napájení je komplikovanější výroba, protože je nutné vrtat díry do substrátu.

Kritickým rozměrem flíčkové antény, je šířka anténního prvku  $B$ , který bývá o něco kratší než polovina vlnové délky v dielektriku  $\lambda_g$ . Pro jeho výpočet slouží vzorec

$$B \approx 0,49 \cdot \lambda_g = 0,49 \cdot (\lambda / \varepsilon_r). \quad (8)$$

Pro délku flíčku platí podmínka  $A < \lambda_g$ . Rozměr  $L$ , tedy vzdálenost napájecí sondy od okraje flíčku, je pak rozhodující pro impedanční přizpůsobení. Při návrhu je tedy nejprve nutné zjistit šířku flíčku, tak aby rezonoval na námi požadované frekvenci, a poté ho impedančně přizpůsobit vhodným umístěním napájení. [1]



### 3.3 Parabolický reflektor

Je tvořen vrchlíkem paraboloidu. Tvořící křivka paraboloidu je oblouk paraboly s osou na spojnici vrcholu  $V$  a ohniska  $F$ . Rotační paraboloid je definován dvěma parametry: ohniskovou vzdáleností  $f$  a velikostí ústí apertury  $D$ , viz obr. 2.

Základní rovnice rotačního paraboloidu je

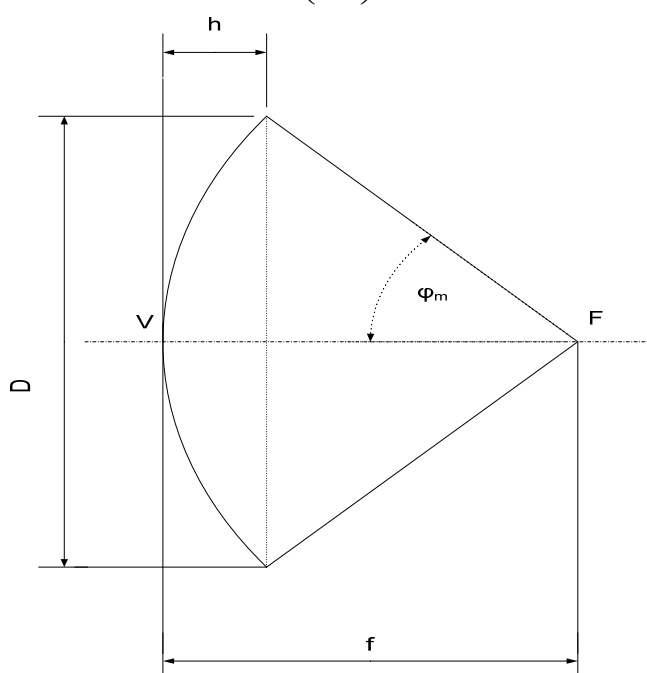
$$y^2 + z^2 = 4fx, \quad (9)$$

úhel otevření ústí, tzv. úhlová apertura je

$$\operatorname{tg}(\varphi_m/2) = D/4f \quad (10)$$

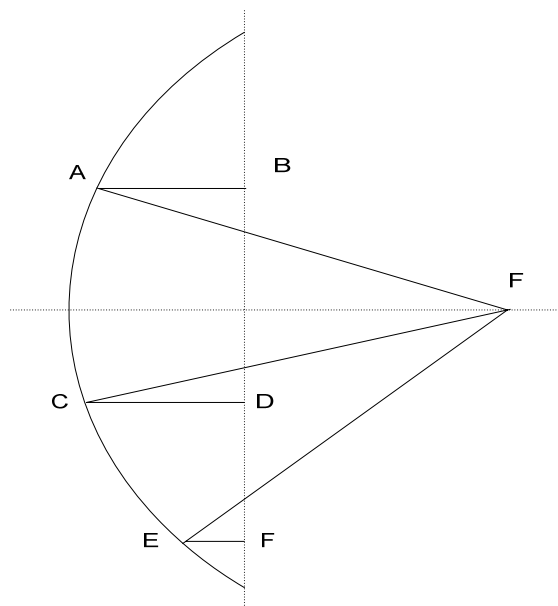
a hloubka reflektoru  $h$  se dá vyjádřit vzorcem

$$h = f \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) \quad (11)$$



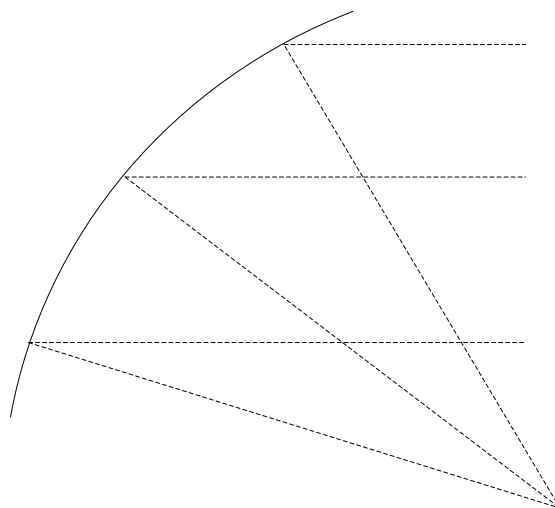
**Obr. 4:** Řez rotačním paraboloidem

Optické vlastnosti jsou dány geometrií paprsků vycházejících z ohniska  $F$ . Je-li v ohnisku  $F$  umístěn bodový zdroj záření, pak dráhy, které uběhnou paprsky  $FAB$ ,  $FCD$  a  $FEF$  jsou stejné. Je-li v ohnisku umístěn zdroj elektromagnetických vln, pak všechny paprsky, které dosáhnou ústí apertury jsou ve fázi a vznikne rovinná vlna, soustřeďující energii převážně do jednoho směru kolmého k rovině ústí, viz obr. 3.



**Obr. 5:** Dráhy paprsků v reflektoru

V takovémto případě vždy dochází k odrazu části energie zpět do primárního zářiče, což způsobuje impedanční nepřizpůsobení. Tomuto jevu se dá zabránit konstrukcí reflektorové antény s offset napájením, kdy je z rotačního paraboloidu použita pouze určitá část, a cílem je, aby odražené paprsky nedopadaly zpět na primární zářič, viz obr. 4. [1] [3]



**Obr. 6:** Reflektor s offset napájením

## 4. Návrh antény s trychtýřovým ozařovačem

### 4.1 Návrh trychtýřového ozařovače

Pro návrh trychtýřového ozařovače mi byla vedoucím práce zadána pracovní frekvence  $f=3$  GHz. Při návrhu jsem začal modelováním vlnovodu, ze kterého jsem dále pozvolným rozšířením jeho ústí vytvořil konečnou trychtýřovou anténu. Pro rozměry vlnovodu bylo jedinou podmínkou to, aby pracoval v pásmu jednovydovosti. To znamená, že se jím bude šířit pouze vid s nejnižší kritickou frekvencí a všechny vidy vyšší budou utlumeny.

Pro kritickou vlnovou délku  $\lambda_m$  obdélníkového vlnovodu platí:

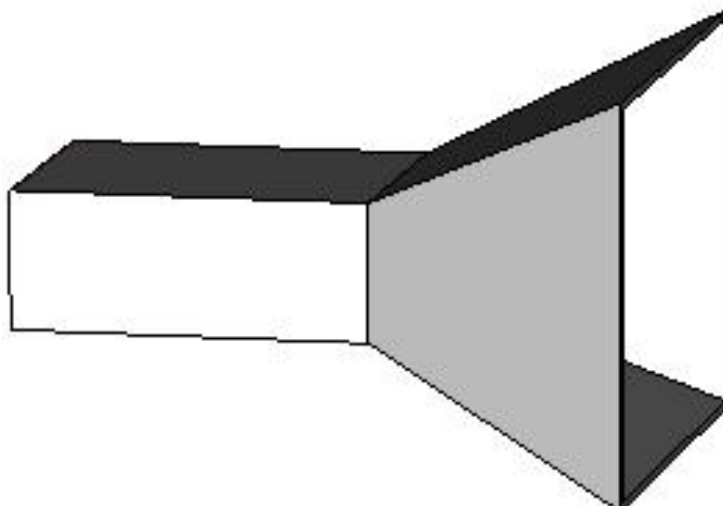
$$\lambda_m = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}} \quad (12)$$

Kde  $m, n$  jsou indexy jednotlivých vidů, a  $a, b$  rozměry delší a kratší strany vlnovodu. [1]

V obdélníkovém vlnovodu, kde strana  $a$  je větší než  $b$ , jsou dvěma nejnižšími vidy  $TE_{10}$  a  $TE_{20}$ . Bylo tedy nutné, aby strana  $a$  byla delší než 5 cm a kratší než 10 cm.

Nakonec jsem se pro ulehčení konstrukce rozhodl použít normovaný vlnovod R 32 s vnitřními rozměry  $a=72,14$  mm a  $b=34,04$  mm, který tento požadavek ideálně splňuje. Tento vlnovod je přímo určen pro kmitočtové pásmo 2,6 až 3,95 GHz, se středím kmitočtem 3 GHz. V simulacích jsem počítal s délkou vlnovodu 10 cm.

V dalším kroku jsem se věnoval návrhu trychtýřovitěho rozšíření. Úhel rozšíření trychtýře jsem zvolil  $25^\circ$  a pro tuto hodnotu jsem hledal optimální délku, při které bych dosáhl ideálního impedančního přizpůsobení, čili nejmenšího činitele odrazu. Toho se mi podařilo dosáhnout pro délku trychtýře  $L=76,4$  mm. Rozměry ústí trychtýře jsou pak  $143,4 \times 105,3$  mm.



**Obr. 7:** Navržený trychtýřový ozařovač

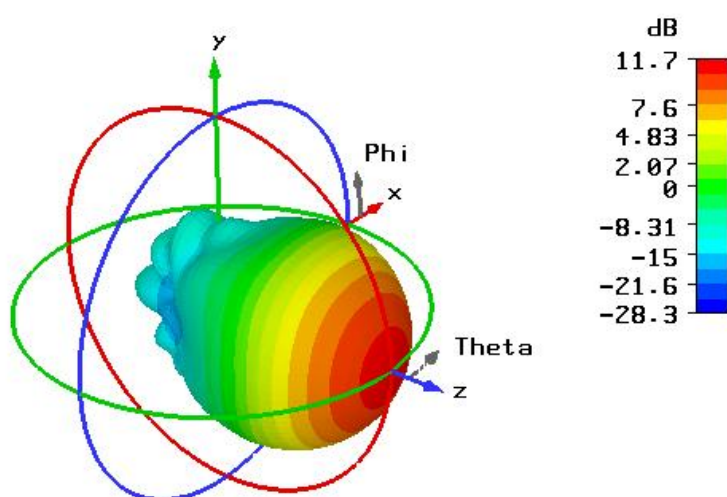
#### 4.1.1 Parametry trychtýřového ozařovače

Zisk: 11,8 dB

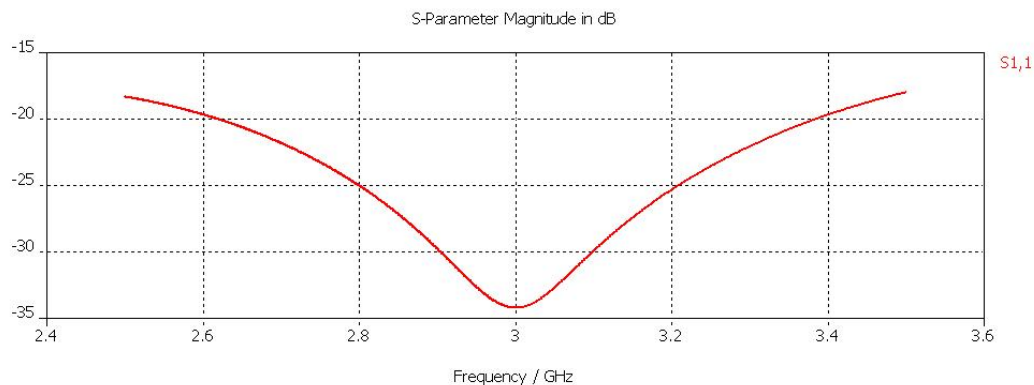
Šířka hlavního laloku:     - v horizontální rovině: 46,1°  
                                       - ve vertikální rovině: 49,7°

Pokles o -10 dB ( $\varphi_m$ ):     - v horizontální rovině: 45,1°  
                                       - ve vertikální rovině: 43,1°

Hodnota činitele odrazu  $S_{11}$ : -34,18 dB



**Obr. 8:** Vyzařovací charakteristika trychtýřového ozařovače



**Obr. 9:** Činitel odrazu trychtýřového ozařovače

## 4.2 Návrh reflektorové antény

Jako maximální hodnotu velikosti ústí reflektoru jsem zvolil průměr  $D=600$  mm. Pro takto velké ústí reflektoru, o ploše  $S = 0,283 \text{ m}^2$  je teoretický maximální zisk, při hodnotě  $\nu=0,8$ , roven podle vzorce (5)

$$G_{\max} = \nu \cdot \frac{4\pi \cdot S}{\lambda^2} = 0,8 \cdot \frac{4\pi \cdot 0,283}{0,1^2} = 284,25$$

$$G_{\max} (\text{dB}) = 10 \cdot \log(G_{\max}) = 10 \cdot \log(284,25) = 24,54 \text{ dB}$$

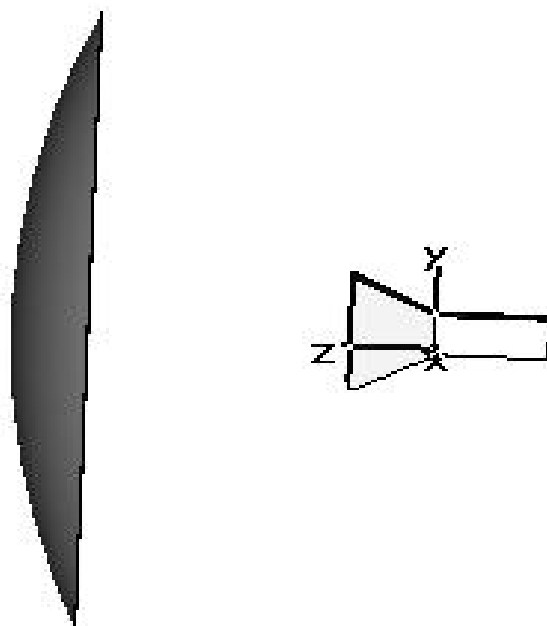
Můžeme počítat s maximální hodnotou  $\nu$ , protože v simulačním programu nemusíme počítat s nedostatkem skutečné antény – např. máme k dispozici dokonalý elektrický vodič a anténa má dokonalý tvar, protože nemohlo dojít k žádným výrobním nepřesnostem.

Pomocí vzorce (9) jsem našel takovou přibližnou vzdálenost reflektoru od primárního zářiče, přesněji od jeho fázového středu, při které je úroveň ozáření na okraji reflektoru o 10 dB nižší než v jeho středu

$$f = \frac{D}{4 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_m / 2)} = \frac{0,6}{4 \cdot \operatorname{tg}(50 / 2)} = 322 \text{ mm}.$$

Umístil jsem reflektor do této vzdálenosti, a potom změnami dvou parametrů (hloubka reflektoru  $h$  a vzdálenost apertury reflektoru od ústí ozařovače  $l$ ) hledal jeho ideální polohu tak, abych dosáhl co nejvyššího zisku, nejúžšího hlavního laloku a nejnižší úrovně postranních laloků.

Nejlepších výsledků jsem dosáhl při hloubce reflektoru  $h=69,3$  mm a vzdálenosti mezi ústím reflektoru a ústím apertury  $l=233,54$  mm.



**Obr. 10:** Navržená reflektorová anténa

#### 4.2.1 Parametry reflektorové antény

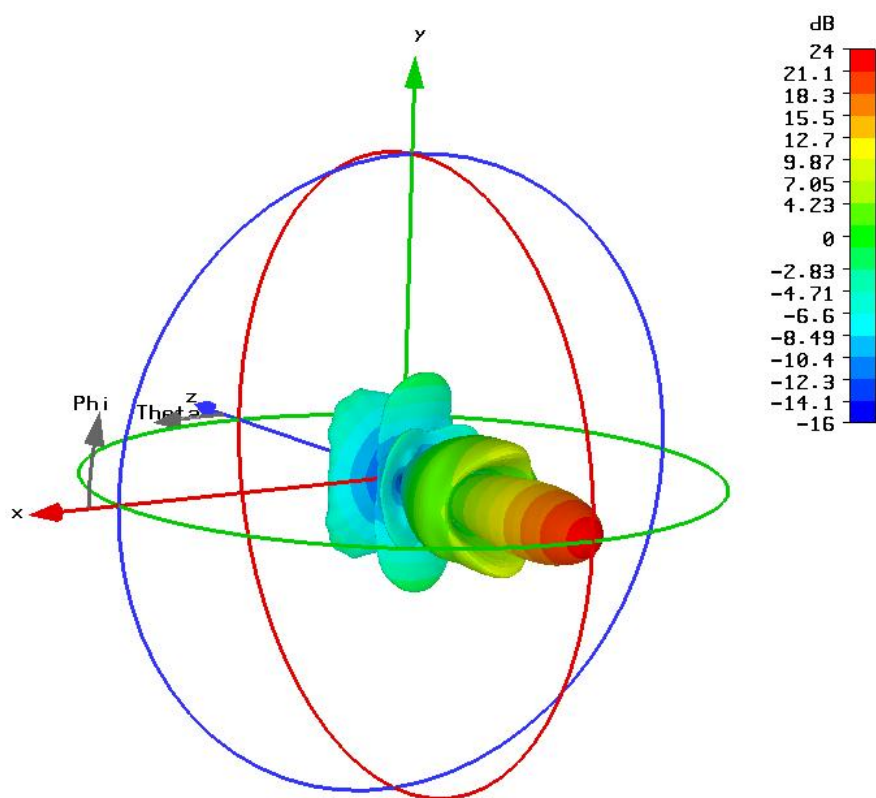
Zisk: 23,97 dB

Šířka hlavního laloku:      - v horizontální rovině: 11,0°  
    - ve vertikální rovině: 10,4°

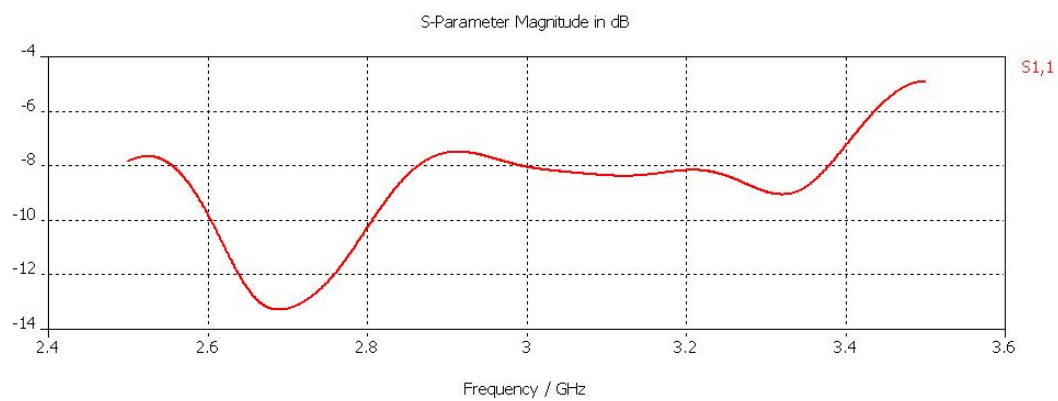
Úroveň postranních laloků:      - v horizontální rovině: -19,4 dB  
    - ve vertikální rovině: -15,2 dB

Hodnota činitele odrazu  $S_{11}$ : -8,023 dB

Impedanční přizpůsobení je v tomto případě velmi špatné. To je způsobeno tím, že energie, která dopadá přímo na střed reflektoru se odráží zpět do ústí ozařovače.



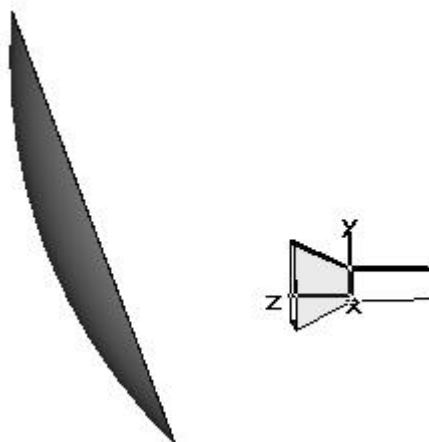
**Obr. 11:** Vyzařovací charakteristika reflektorové antény



**Obr. 12:** Činitel odrazu reflektorové antény

## 4.3 Návrh reflektorové antény s offset napájením

Využil jsem parabolický reflektor z předchozího návrhu a otočil ho kolem své osy o  $20^\circ$ . Dalšími úpravami parametrů (posunutí ve směru osy  $y$  a  $z$ ) jsem dosáhl ideálního impedančního přizpůsobení díky tomu, že minimum odražené energie dopadá zpět na primární zářič. Soustava má ale menší zisk, protože ne všechna energie dopadající na reflektor je odrážena požadovaným směrem. Mnohem větší je ale zhoršení u šířky vyzařovaného svazku, který se v horizontální rovině rozšířil skoro o 50%. Toto zhoršení je ale na druhou stranu vyváжено větším potlačením postranních laloků.

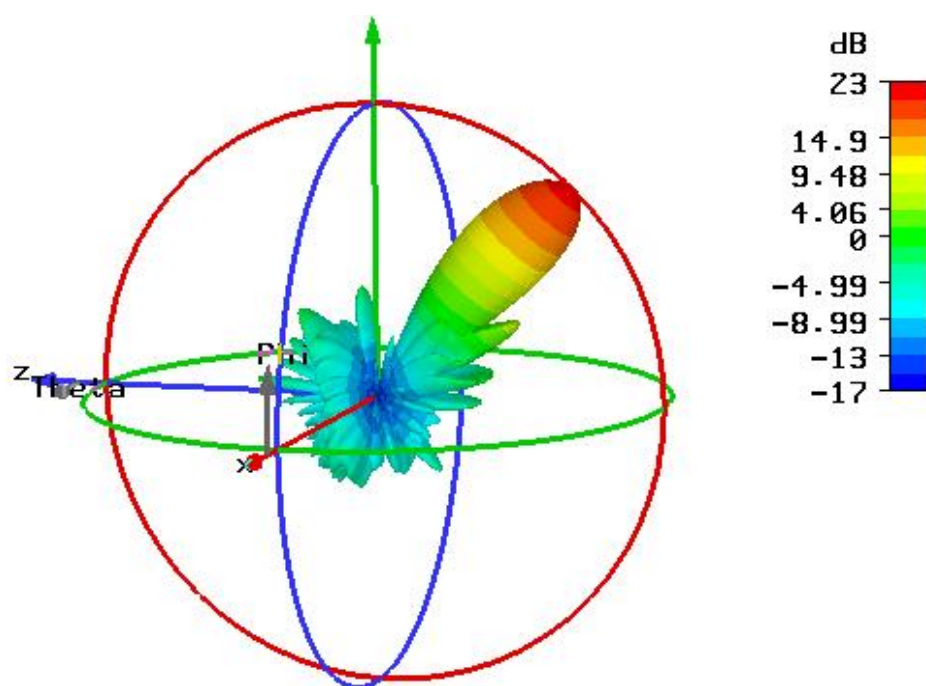


**Obr. 13:** Návrh reflektorové antény s offset napájením

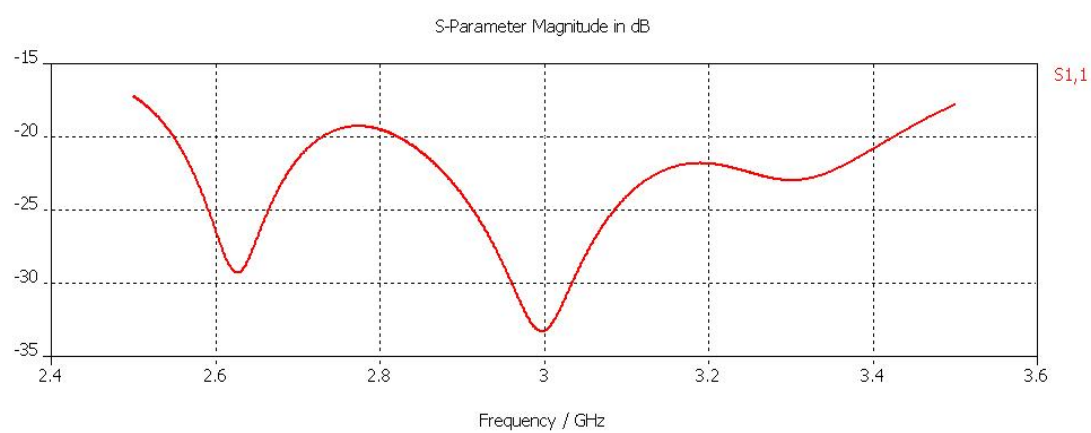
### 4.3.1 Parametry reflektorové antény s offset napájením

Zisk:		23,02 dB
Šířka hlavního laloku:	- v horizontální rovině:	16,3°
	- ve vertikální rovině:	13,2°
Úroveň postranních laloků:	- v horizontální rovině:	-23,3 dB
	- ve vertikální rovině:	-17,3 dB
Hodnota činitele odrazu $S_{11}$ :		-33,24 dB





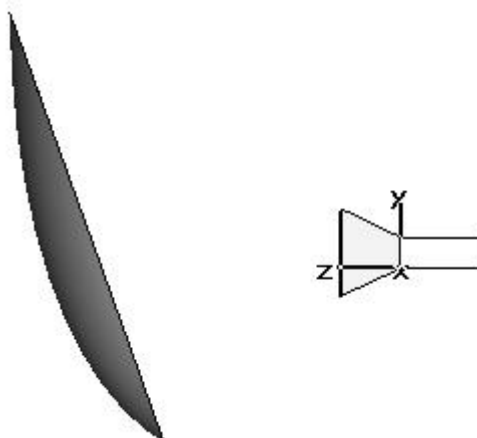
**Obr. 14:** Vyzařovací charakteristika reflektorové antény s offset napájením



**Obr. 15:** Činitel odrazu reflektorové antény s offset napájením

## 4.4 Návrh offsetové reflektorové antény

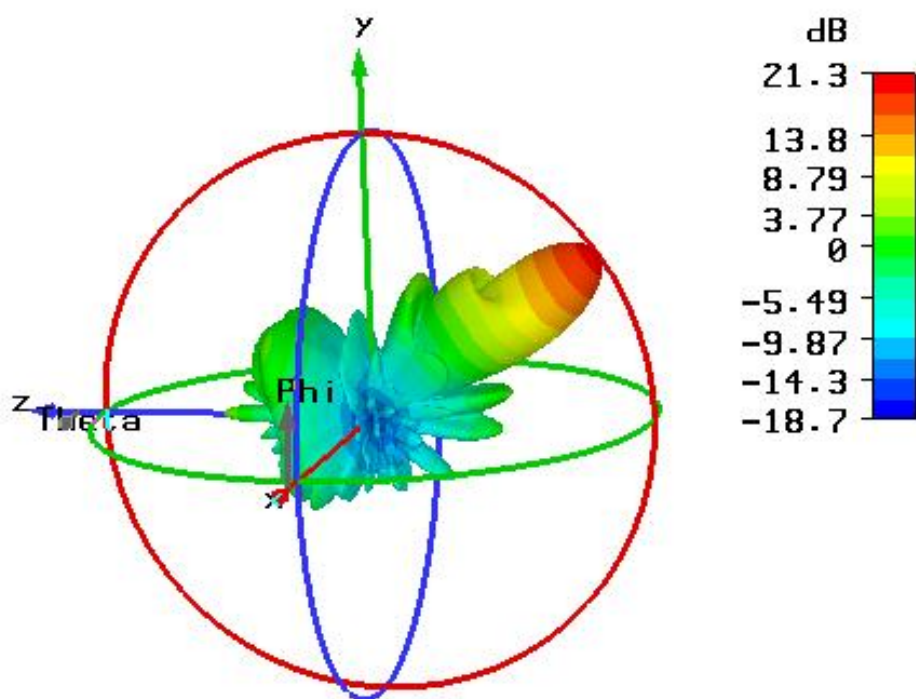
Oproti předchozímu návrhu jsem původní reflektor v anténní soustavě nahradil novým. Ten už není vrchlíkem paraboloidu, ale výřezem z paraboloidu mimo jeho rotační osu. Oproti předchozímu návrhu se ale nedostavilo očekávané zlepšení parametrů celé soustavy. Hlavním zlepšením bylo dosažení lepší směrové charakteristiky, ale ani to nebylo příliš velké.



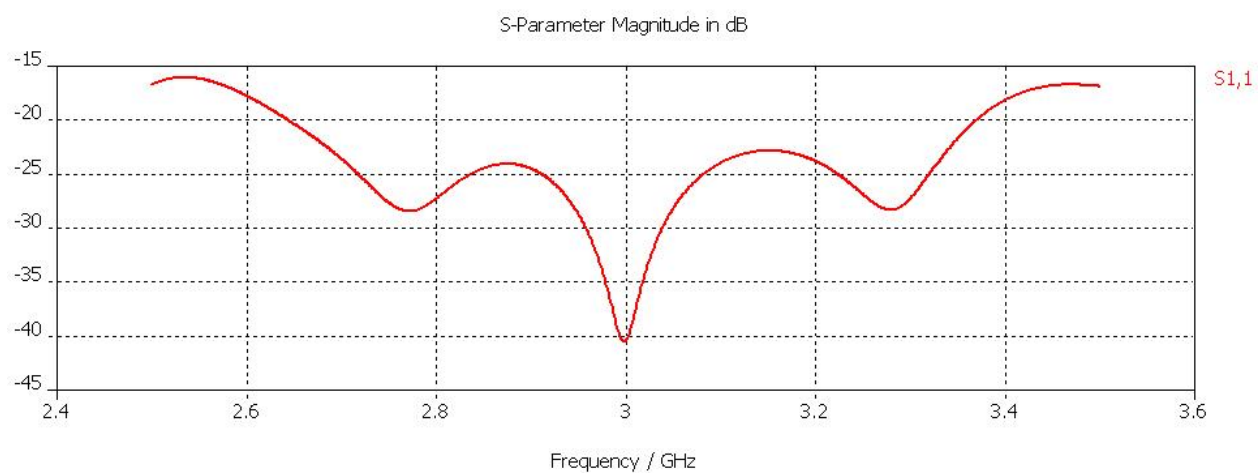
**Obr. 16:** Návrh offsetové reflektorové antény

### 4.4.1 Parametry offsetové reflektorové antény

Zisk:		21,3 dB
Šířka hlavního laloku:	- v horizontální rovině:	22,6°
	- ve vertikální rovině:	12,6 °
Úroveň postranních laloků:	- v horizontální rovině:	-24,7 dB
	- ve vertikální rovině:	-14,5 dB
Hodnota činitele odrazu $S_{11}$ :		-40,47 dB



**Obr. 17:** Vyzařovací charakteristika offsetové reflektorové antény



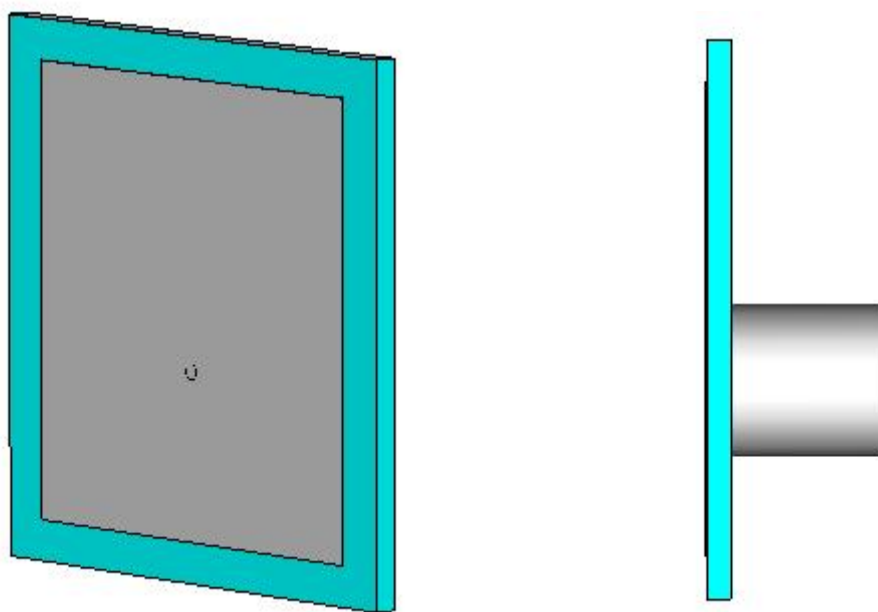
**Obr. 18:** Činitel odrazu offsetové reflektorové antény

## 5. Návrh antény s flíčkovým (patch) ozařovačem

K návrhu nového způsobu řešení ozařovače jsme se uchýlili poté, co se ukázalo, že není k dispozici vhodný vlnovod, který by byl schopen pracovat na frekvenci 3 GHz, pro kterou byl optimalizován původní trychtýřový ozařovač, a nebylo by proto možné provést následná měření. Ty byly nejen součástí zadání mé bakalářské práce, ale také mají dokázat výsledky softwarových simulací. Proto se v následující části mé práce budu věnovat pouze impedančnímu přizpůsobení patche, které jsme následně měřili.

### 5.1 Návrh patch ozařovače

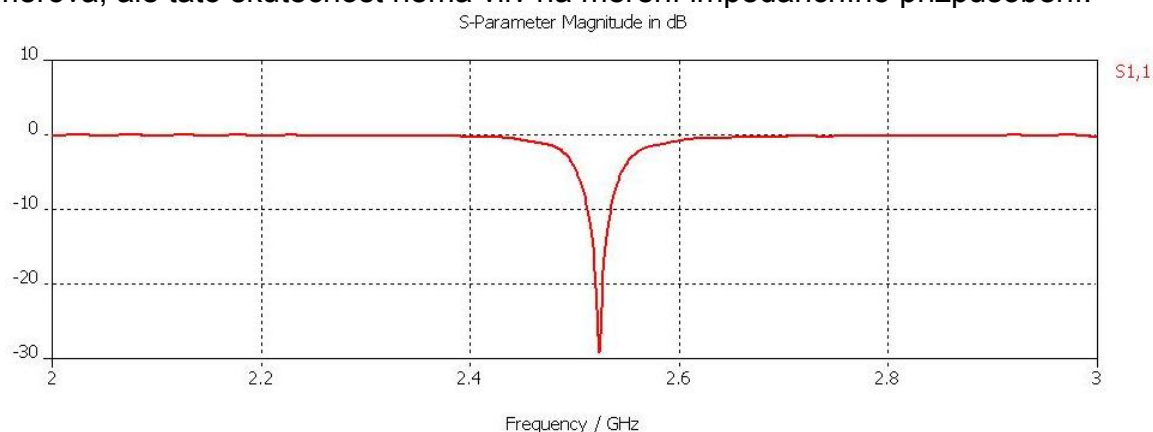
Pro patch ozařovač mi byla vedoucím práce zadána nová pracovní frekvence  $f=2,5$  GHz. Simulacemi v programu CST Microwave Studio jsem určil ideální rozměry antény následovně. Šířka a délka zemnicí plochy a substrátu 36 mm, rozměr  $A=29,5$  mm, rozměr  $B=30,5$  mm. Pozice koaxiální sondy je 4,5 mm pod geometrickým středem flíčku, tedy rozměr  $L=10,75$  mm. Pro výrobu jsme se rozhodli použít materiál 25n, o výšce 1,54 mm a relativní permitivitě  $\varepsilon_r = 3,28$ . Takto navržená anténa má přesnou rezonanční frekvenci  $f=2,52$  GHz.



**Obr. 19:** Navržený patch ozařovač – pohled zepředu a z boku

### 5.1.1 Impedanční přizpůsobení patch ozařovače

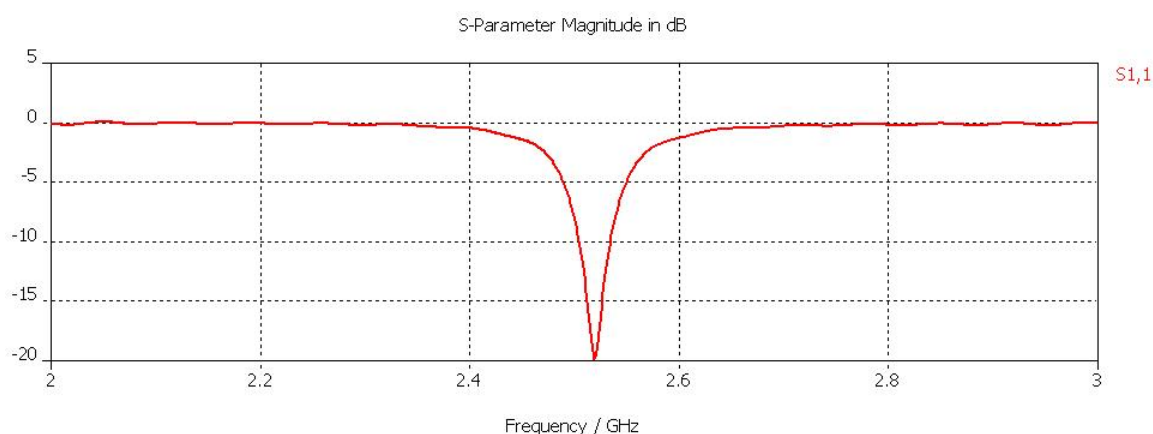
Je vidět že anténa rezonuje na požadované frekvenci, viz obr. 20. Hodnota činitele odrazu je  $-29,13$  dB. Na tento parametr jsem se soustředil v první řadě. Z dalších parametrů bych zmínil zisk  $5,42$  dB a šířku hlavního laloku, které je  $94,6^\circ$  v horizontální rovině a  $99,6^\circ$  ve vertikální rovině. Je vidět, že anténa je velmi málo směrová, ale tato skutečnost nemá vliv na měření impedančního přizpůsobení.



**Obr. 20:** Činitel odrazu patch ozařovače

## 5.2 Reflektorová anténa s patch ozařovačem

Pro tuto simulaci jsem použil parabolu z kapitoly 4.4. Výsledky simulací pro zisk a směrovou charakteristiku nedosahují příliš dobrých hodnot, ale pro mě byla důležitá opět především hodnota impedančního přizpůsobení. Ta se pro jednotlivé vzájemné polohy ozařovače a reflektoru během simulací téměř nelišila. Proto nebylo až tak důležité hledat správnou polohu ozařovače při měření v laboratoři. Ta by měla vliv pouze na směrovou charakteristiku.



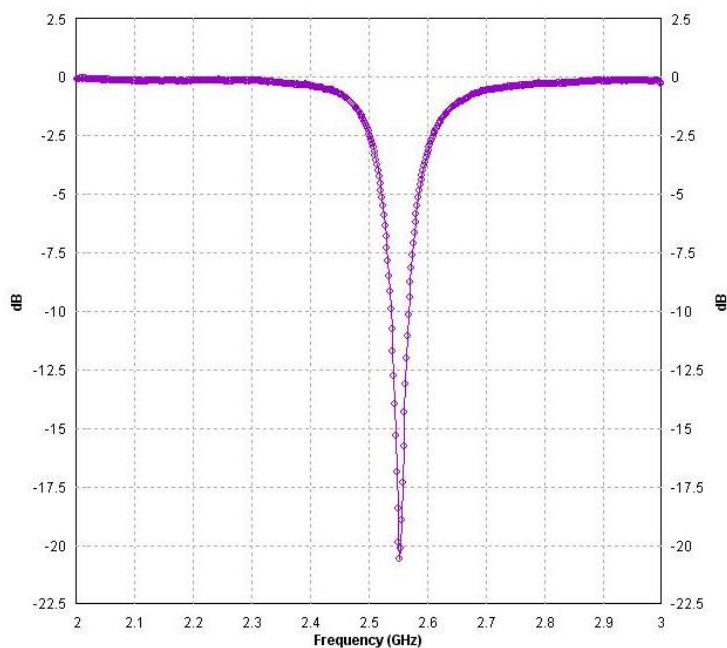
**Obr. 21:** Činitel odrazu reflektorové antény s patch ozařovačem

## 6. Praktická měření

K praktickým měřením jsme přistoupili po vyrobení patch antény ve školní dílně. Po připájení SMA konektoru jsme přistoupili k měření na přístroji *Agilent E8364B PNA Network Analyzer* (10 MHz – 50 GHz). Přístroj nám pomohl jednoduše změřit hodnotu činitele odrazu antény nejprve samotné patch antény.



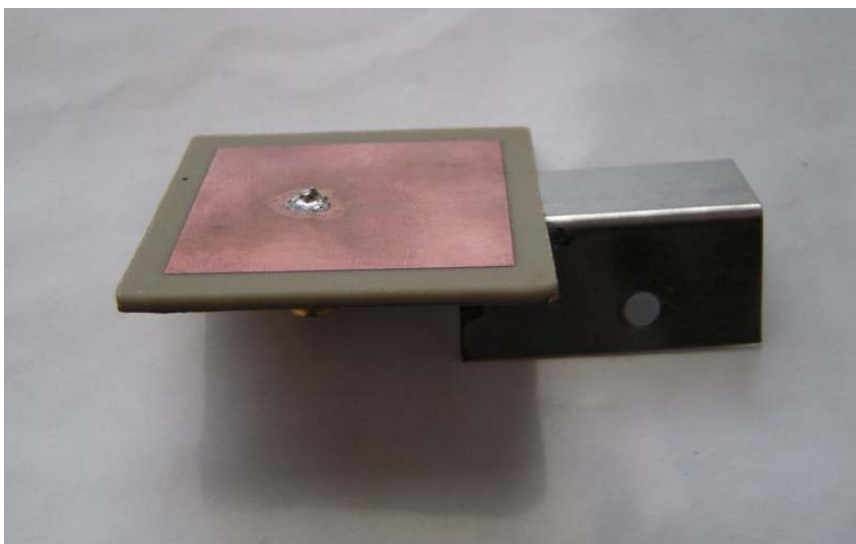
**Obr. 22:** Měřicí přístroj Agilent E8364B



**Obr. 23:** Skutečný činitel odrazu patch ozařovače

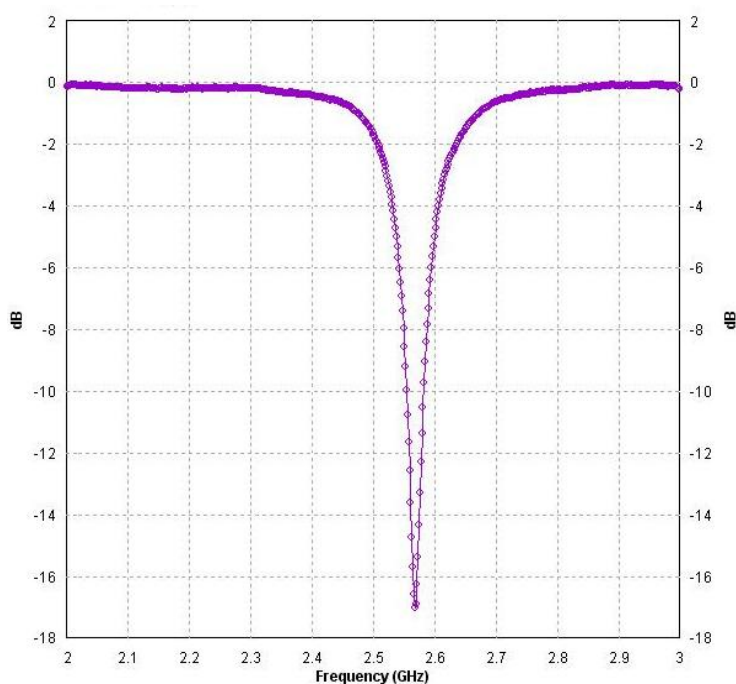
Rezonanční frekvence skutečné antény je mírně posunutá, asi o 30 MHz, což je s největší pravděpodobností způsobeno výrobní nepřesností. Po vyleptání flíčku do substrátu bylo nutné nejprve odstříhnout velké části nevyleptané mědi okolo antény a zbytek mechanicky obrousit pomocí pilníku (tento postup nebyl velmi přesný).

Pro další měření jsme zakoupili offsetovou hliníkovou parabolou o průměru 60 cm. Ta odpovídá parabole mnou použité v předešlých simulacích. Opět jsme se zaměřili pouze na měření impedančního přizpůsobení. Pro uchycení ozařovače k parabole bylo nutné připájet k zemní ploše antény malý kousek plechu ve tvaru písmene L, viz obr. 24.



**Obr. 24:** Vyrobený patch ozařovač

Proto jsme zopakovali měření impedančního přizpůsobení ozařovače.



**Obr. 25:** Skutečný činitel odrazu upraveného patch ozařovače



Jak je vidět z výsledku měření, viz obr. 25, připájení plíšku mělo negativní vliv na hodnotu činitele odrazu, který klesl asi o 4 dB. Důležité ale je, že pracovní frekvence antény zůstala nezměněna.

Jako poslední jsme přistoupili k měření s parabolou.

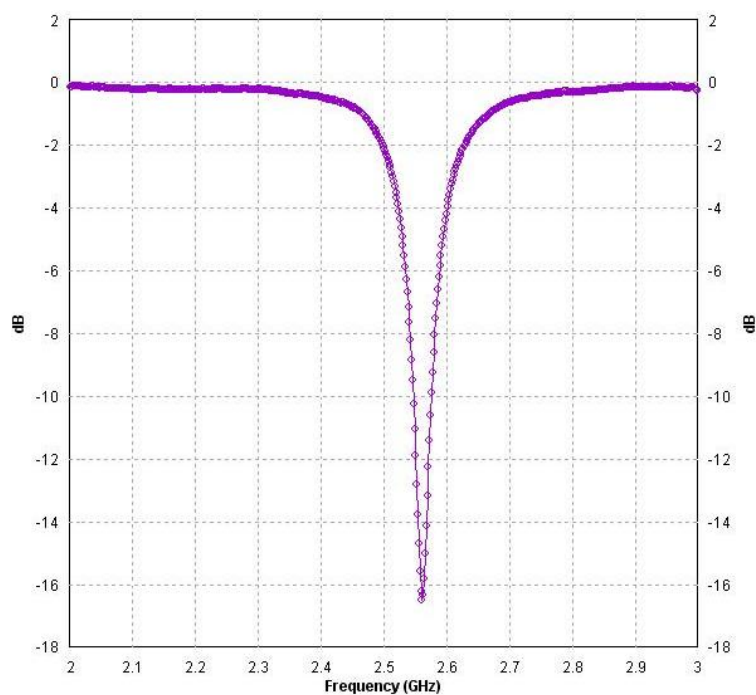


**Obr. 26:** Uchycení patch ozařovače k parabole



**Obr. 27:** Celá anténní soustava





**Obr. 28:** Skutečný činitel odrazu anténní soustavy

Stejně jako při softwarových simulacích, umístění paraboly před ozařovač nemělo takřka žádný vliv na hodnotu impedančního přizpůsobení patch antény. Hodnota činitele odrazu  $S_{11}$  lehce klesla oproti měření bez paraboly, což také odpovídá výsledkům simulací na počítači.

## 7. Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo navrhnout malou parabolickou anténu s co nejlepším vyzařovací charakteristikou a impedančním přizpůsobením. Následně ověřit simulaci v jiném komerčním programu a poté anténu zrealizovat a její parametry ověřit praktickým měřením.

V průběhu mé práce jsem se nejprve zaměřil na návrh reflektorové antény, s trychtýřovým ozařovačem. Dosažené výsledky považuji za poměrně kvalitní. Pro klasickou reflektorovou anténu jsem dosáhl vysokého zisku a směrových charakteristik s malými postranními laloky, ale poněkud horším impedančním přizpůsobením. Zlepšení impedančního přizpůsobení jsem dosáhl simulací offsetové antény. Pro oba použité reflektory jsem dosáhl výborné impedančního přizpůsobení, za cenu mírného zhoršení zisku a směrových charakteristik.

V další části mé práce jsem měl ověřit předchozí simulace v jiném komerčním programu. Od této části zadání jsme upustili, protože vybraný program Ansoft HFSS nebyl pro simulaci struktury reflektorové antény vhodný. Celá struktura byla příliš složitá a paměťové nároky příliš velké. Jiný vhodný simulační software nebyl bohužel k dispozici.

Posledním krokem byla praktická měření. Protože výroba reflektoru by byla příliš náročná, rozhodli jsme se s vedoucím práce parabolu zakoupit. Ta svými rozměry odpovídá parabole mnou navržené. Jako další problém se ukázala výroba trychtýřového ozařovače, protože nebyl k dispozici vhodný vlnovod, schopný pracovat na původně zadané frekvenci 3 GHz. Proto jsem navrhl malou patchovou anténu pracující na  $f=2,5$  GHz. Po její výrobě nebyl problém ověřit výsledek softwarových simulací v laboratoři. Z výsledků měření je zřejmé, že program CST Microwave Studio je přesným a účinným nástrojem pro návrh anténních struktur.

## 8. Literatura

- [1] PROCHÁZKA, Miroslav: ANTÉNY – encyklopedická příručka, 1. vydání, BEN – technická literatura, Praha, 2000, ISBN 80-86056-59-7
- [2] KUPČÁK, Dominik: Antény radiolokátorů pro řízení letového provozu – díl I. (Teoretické základy šíření a vyzařování elektromagnetických vln), Pardubice, 1986
- [3] KUPČÁK, Dominik: Antény radiolokátorů pro řízení letového provozu – díl II. (Základy techniky radiolokačních antén), Pardubice, 1986
- [4] ČERNOHORSKÝ, Dušan a NOVÁČEK Zdeněk: Antény a šíření rádiových vln, 1. vydání, Brno, 2001, ISBN 80-214-1943-1
- [5] HANUS, Stanislav a SVAČINA, Jiří: Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika-přenášky, 2. vydání, doplněné – dotisk, Brno, 2004, ISBN 80-214-2222-X